



ISSN 0760-1751

PANGAEA

N° 47/48 – Juin/Décembre 2010

CENTRE INTERNATIONAL POUR LA FORMATION ET LES ECHANGES EN GEOSCIENCES

INTERNATIONAL CENTER FOR TRAINING AND EXCHANGES IN THE GEOSCIENCES

Volume spécial :

Géosciences & Développement

IMPACTS DE L'HOMME ET DU CLIMAT SUR LES MILIEUX SAHELIENS

Editeurs scientifiques : Zibo GARBA, Benjamin NGOUNOU NGATCHA, David SEBAG, Alain DURAND

VARIABILITE DES PRECIPITATIONS AU SAHEL CENTRAL ET RECHERCHE DU FORCAGE CLIMATIQUE PAR ANALYSE DU SIGNAL : LA STATION DE MAÏNE-SOROA (SE NIGER) ENTRE 1950 ET 2005

Bastien DIEPPOIS¹, Alain DURAND^{1,3}, Matthieu FOURNIER¹,
Nicolas MASSE¹, David SEBAG^{1,3}, Bouba HASSANE^{1,2,3}

1- Université de Rouen, CNRS-INSU UMR 6143, 76821 Mont-Saint Aignan cedex, France

2- Université Abdou Moumouni, Dpt Sciences de la Terre, BP 10662, Niamey, Niger

3- Projet CORUS-2 6116

correspondant : Bastien.dieppo@etu.univ-rouen.fr

RESUME

Une régression polynomiale non-paramétrique (méthode LOESS) appliquée aux précipitations annuelles de Maïné-Soroua (SE Niger) montre trois périodes : humide (1950-1967), aride (1968-1993), semi-aride (1994-2005). L'utilisation de la transformée en ondelettes continues permet de séparer la variabilité interne (haute fréquence) et la variabilité forcée (basse fréquence). Nous avons pu mettre en évidence sept modes de fréquence localisés dans le temps : deux modes intra-saisonniers (4-9jrs, 16-20jrs), deux modes saisonniers (6 mois, 1an), deux modes pluriannuels (2-4ans et 5-8ans) et un mode quasi-décennal (12-18ans). Lors du régime humide, on retrouve une forte variance des modes saisonniers liés à la ZCIT et des modes pluriannuels se succédant dans le temps (5-8ans puis 2-4ans) en liaison avec les températures de l'Atlantique Tropical Nord (TNA) puis avec l'Anticyclone des Açores. Ces modes basses fréquences sont synchrones avec une activité convective mature (mode 4-9jrs) et l'apparition d'une perturbation (mode 16-20jrs) lors de la transition entre la phase océanique et la phase continentale de la mousson. Au contraire, lors des années arides on retrouve le mode quasi-décennal, en lien avec les températures de l'Atlantique Tropical Sud (TSA), forçant une activité convective peu développée et perturbée au cœur de la phase continentale.

Rainfall variability in the Central Sahel and climate forcing by signal analysis: Maïné-Soroua station (SE Niger) over the period 1950-2005

ABSTRACT

A non-parametric polynomial regression applied to the Maïné-Soroua annual rainfall timeseries reveals three periods: wet (1950-1967), arid (1968-1993) and semi-arid (1994-2005). Continuous Wavelet Transform allows crossing internal variability (high frequency) and forcing variability (low frequency). We could reveal seven frequency modes highly localized in time: two intraseasonal modes (4-9 days, 16-20 days), two seasonal modes (6mo, 1yr), two interannuals modes (2-4yrs, 5-8yrs) and one quasidecadal mode (12-18yrs). During wet period, we notice a strong variance across seasonal modes in relation to ITCZ and the two interannual modes succeeding in time (5-8yrs then 2-4yrs) in connection with the Tropical North Atlantic temperatures (TNA) then Azores high. At the same time, we notice great convective activity (4-9days) and the oceanic/continental transition phase disturbance (16-20days). During the arid period, we notice the quasidecadal mode in relation with the Tropical South Atlantic temperatures (TSA), forcing a weak convective activity and disturbed in the medium of the continental phase.

Introduction

Au Sahel, depuis la fin des années 60 jusqu'au milieu des années 90, est apparu un déficit pluviométrique pratiquement continu avec le développement de sécheresses persistantes (CCMA, 2002). Ces sécheresses représentent un des signaux climatiques inter-décennaux les plus forts observés au XXème siècle. A cela se superposent également des variations pluriannuelles (Le Barbé et al., 2002 ; Lebel et Ali, 2009) et intra-saisonnières importantes (Sultan et Janicot, 2003). Les connaissances concernant la Mousson

Africaine (MA) ont récemment beaucoup progressé (CCMA, 2002). Aujourd'hui, on considère la MA comme étant entraînée par une circulation thermique directe répondant aux gradients méridionaux de l'énergie statique humide et sèche (Eltahir et Gong, 1996). La MA est séparée en deux phases : la phase océanique liée à un équilibre radiatif-convectif et la phase continentale liée à un régime de conservation du moment angulaire, et fortement liée au gradient d'humidité de surface et au développement du Jet Africain d'Est (Lebel et al., 2003).

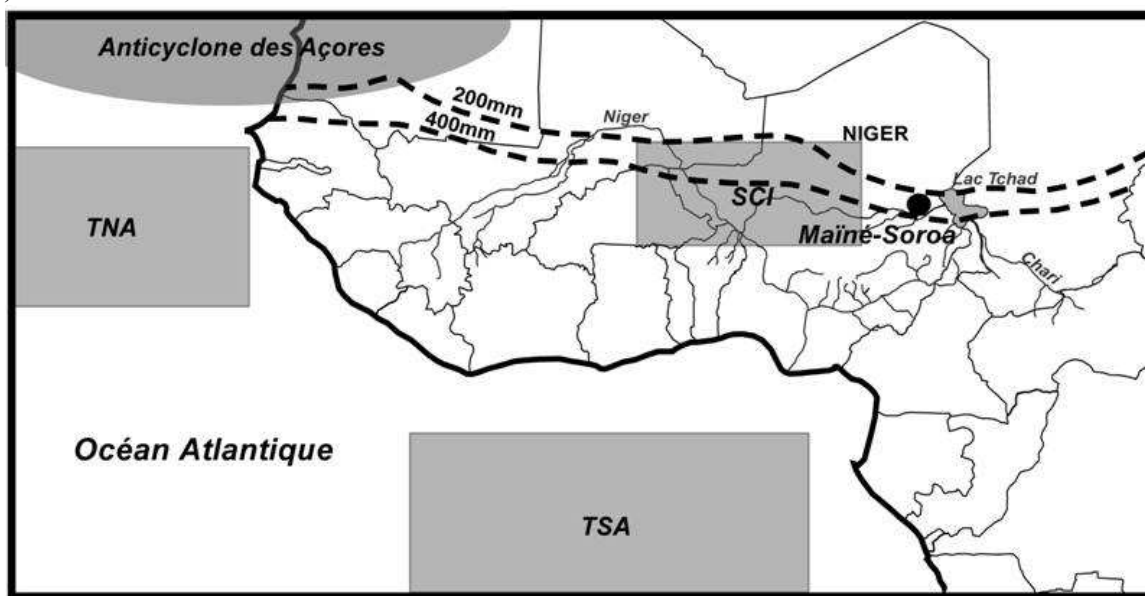


Figure 1 : localisation de la station de Maïné-Soroa et des indices climatiques forçant TNA, TSA et pression atmosphérique aux Açores (d'après L'Hôte et Mahé, 1995 modifié).

Notre étude propose d'analyser à la fois la variabilité pluriannuelle ou forcée (>1 an) et la variabilité intra-saisonnière (<6 mois), à l'aide de méthodes issues du traitement du signal tout en prenant en compte la non-linéarité et l'instationnarité, à partir de la station de Maïné-Soroa (Niger sud-oriental). Nous évaluerons ensuite les modifications de forçages en étudiant la covariance non-linéaire et non-stationnaire de paramètres sensibles affectant la distribution méridienne de la chaleur avec la variabilité pluriannuelle des précipitations de Maïné-Soroa. Pour cela nous utiliserons les températures de surface de l'Atlantique tropical (Ward, 1998) et la pression atmosphérique sur l'Atlantique nord (Cayan, 1991).

2. DONNEES ET CONTEXTE

La station de Maïné-Soroa est située dans la région du Manga au SE Niger (bassin du lac Tchad ;

13°14'N, 11°59'E, altitude 338m) (Fig.1). Cette station située entre les isohyètes 200 et 400mm.an⁻¹ présente la pluviométrie moyenne (370.1mm.an⁻¹) d'une zone sahélienne (Fig.1). Les données pluviométriques mensuelles sur la période 1950-2005 utilisées dans ce travail, sont disponibles sur le site Internet du Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) et ont été complétées par les données journalières de la direction de la Météorologie Nationale du Niger (DMN) suite à un accord avec le projet ROSELT-Niger. L'évolution pluviométrique de cette station montre une corrélation de 0.75 avec l'indice pluviométrique du Sahel Central (SCI : 11-17°N, 0-5°E) établi par Lebel et Ali (2009) (Fig.1).

La pression atmosphérique aux Açores (Station de Ponta Delgada : 37°75'N, 25°67'W, altitude 36m) et les températures de surface de l'Atlantique tropical nord (TNA : 5.5-23.5°N, 57.5-15°W) et sud (TSA : 0-20°S, 30°W-10°E) sur la période

1950-2005 sont en libre accès sur le site Internet de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Fig.1).

3. METHODES

Une analyse du signal débute par l'observation des variations à long terme de la série de données. Pour cela nous avons appliqué une régression polynomiale non paramétrique (méthode LOESS), en ajustant des fenêtres de largeur égale à 100% et 25%. L'ajustement à 100% des valeurs permet d'observer les variations de la tendance, tandis

qu'à 25% l'ajustement permet d'apprécier l'importance de la variabilité pluriannuelle. Pour observer les modes de fluctuations, nous utiliserons des analyses spectrales (Transformée de Fourier et Transformée en ondelettes continues). Le principe de la Transformée de Fourier est basé sur la décomposition d'un signal en une multitude de sinusoides de longueurs infinies. La séparation des fréquences s'appliquant à un signal entier, la localisation temporelle est perdue lors de l'analyse. Pour les processus stationnaires, la localisation temporelle n'a pas d'intérêt particulier.

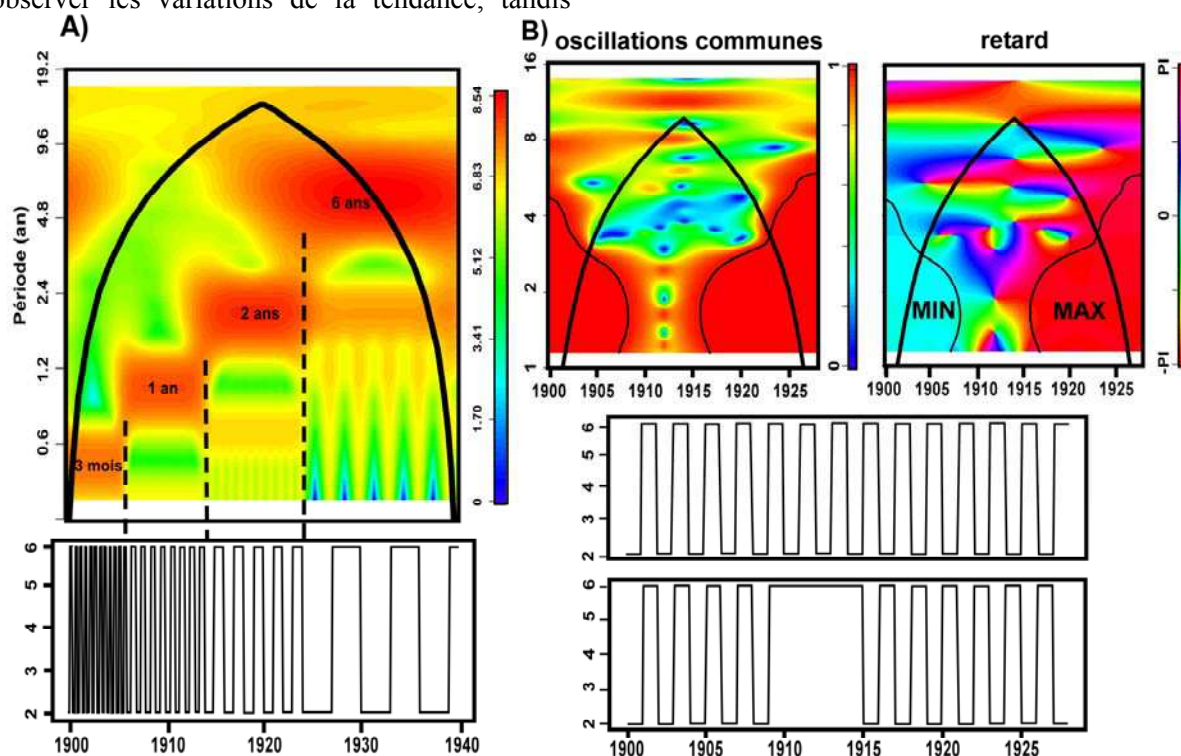


Figure 2.A : exemple de spectre en ondelettes sur une série aléatoire. B : spectre de cohérence par ondelettes entre deux séries aléatoires, d'abord en phase (1900-1910), puis en opposition de phase (1915-1926). (trait noir gras : cône d'influence ; traits noirs fins : limite de confiance 90%)

En revanche, les processus non-stationnaires ne peuvent être correctement décrits par cette décomposition en signaux infinis. Contrairement à la Transformée de Fourier, la Transformée en ondelettes, permet ensuite de décomposer le signal en une somme d'ondes de longueurs finies, localisées dans le temps (Fig.2A). Ceci permet d'analyser les variations localisées de puissance (variance) et l'instationnarité du contenu fréquentiel d'un signal selon un repère cartographique : x =temps, y =périodes et z (couleurs)=variance (Labat, 2005) (Fig.2A). Les analyses de cohérence par ondelettes permettent d'identifier des oscillations communes significatives entre deux signaux à certaines

échelles et pour certains intervalles de temps, sans pour autant que cela implique une corrélation entre les deux signaux au sens strict (Maraun, 2006) (Fig.2B). La phase associée à ce calcul montre le retard entre les deux signaux (Fig.2B). Un signal s'approchant de la valeur π ou $-\pi$ sera en opposition de phase, donc avec un retard maximum. Au contraire une valeur proche de 0 aura un écart minimum et les signaux seront en phase (Fig. 2B). Les valeurs proches de $\pi/2$ et $-\pi/2$ ou quadratures de phase (retard intermédiaire) sont difficilement interprétables.

4. ANALYSE DES PRECIPITATIONS

L'observation de la tendance à long terme (LOESS-100%) montre deux changements de régimes, en 1967 (transition humide-sec) et 1999 (transition sec-humide) (Fig.3). A l'aide du LOESS-25%, on observe la présence de fluctuations pluriannuelles bien structurées sur l'ensemble du signal (Fig.3). Ce second LOESS montre également la transition humide-sec de 1967 mais la transition sec-humide est avancée à 1993 (Fig.3). Le LOESS-25% exprimant plus de variance du signal, établir des régimes à partir de celui-ci est plus adéquat. Quantitativement, la moyenne des précipitations est passée de 442.7 mm.an⁻¹ entre 1950 et 1967 (1^{er} régime humide) à 307.7 mm.an⁻¹ entre 1968 et 1993 (régime aride), puis 396.6 mm.an⁻¹ de 1994-2005 (2nd régime humide). Le 2nd régime humide enregistre l'écart-type le plus important, 106.5 mm/an contre 95.6 et 81.8 mm.an⁻¹ lors des deux régimes précédents. L'importante variabilité des précipitations lors de la période récente, nous permet de la qualifier de semi-aride. L'utilisation d'analyses fréquentielles permet de dissocier la variabilité interne (haute fréquence) de la variabilité forcée (basse fréquence) (CCMA, 2002).

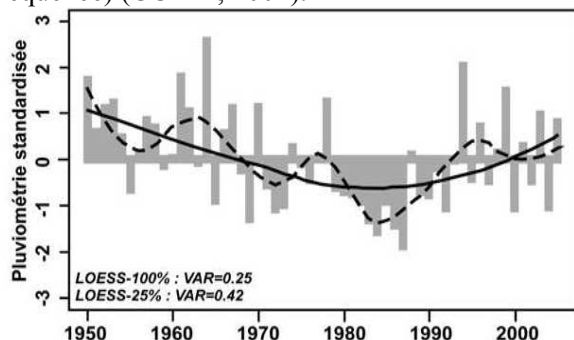


Figure 3 : précipitations annuelles standardisées et LOESS sur la période 1950-2005 (trait continu : LOESS-100% ; pointillés : LOESS-25%).

La Transformée de Fourier et le spectre en ondelettes global permettent d'observer cinq modes de variabilité fréquentielle : deux modes saisonniers (6mois, 1an), deux modes pluriannuels (2-4ans, 5-8ans) et un mode quasi-décennal (12-18ans) (Fig.4). Les modes 2-4ans et 12-18ans sont bien établis dans le domaine fréquentiel en étant centrés sur 3.2ans et 14.6ans (Fig.4). Au contraire, le mode 5-8ans se décompose en deux pics de fréquence à 5.3ans et 8.4ans (Fig.4).

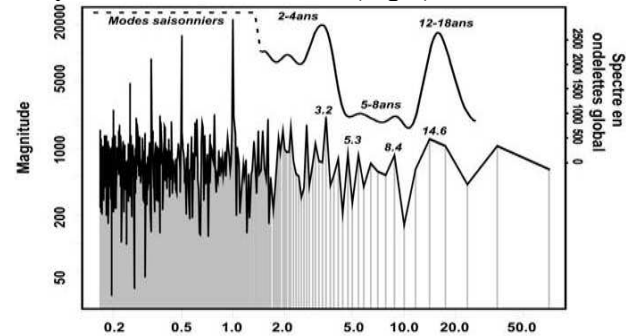


Figure 4 : Transformée de Fourier (données mensuelles) et spectre en ondelettes global des cumuls mensuels de précipitations à Mainé-Soraa sur la période 1950-2005.

Le spectre en ondelettes met en évidence une localisation temporelle des modes fréquentiels très marquée (Fig.5A). Les périodes humide et semi-aride sont caractérisées par une forte variance des modes saisonniers et pluriannuels ; au contraire la période aride est marquée par une forte variance du mode quasi-décennal et une très forte diminution de tous les autres modes (Fig.5A). Globalement la variabilité interne ou saisonnière (étroitement liée aux déplacements de la ZCIT) est dominante (73% de la variance totale) (Fig.5B). La variabilité forcée exprime 12.5% de la variance du signal.

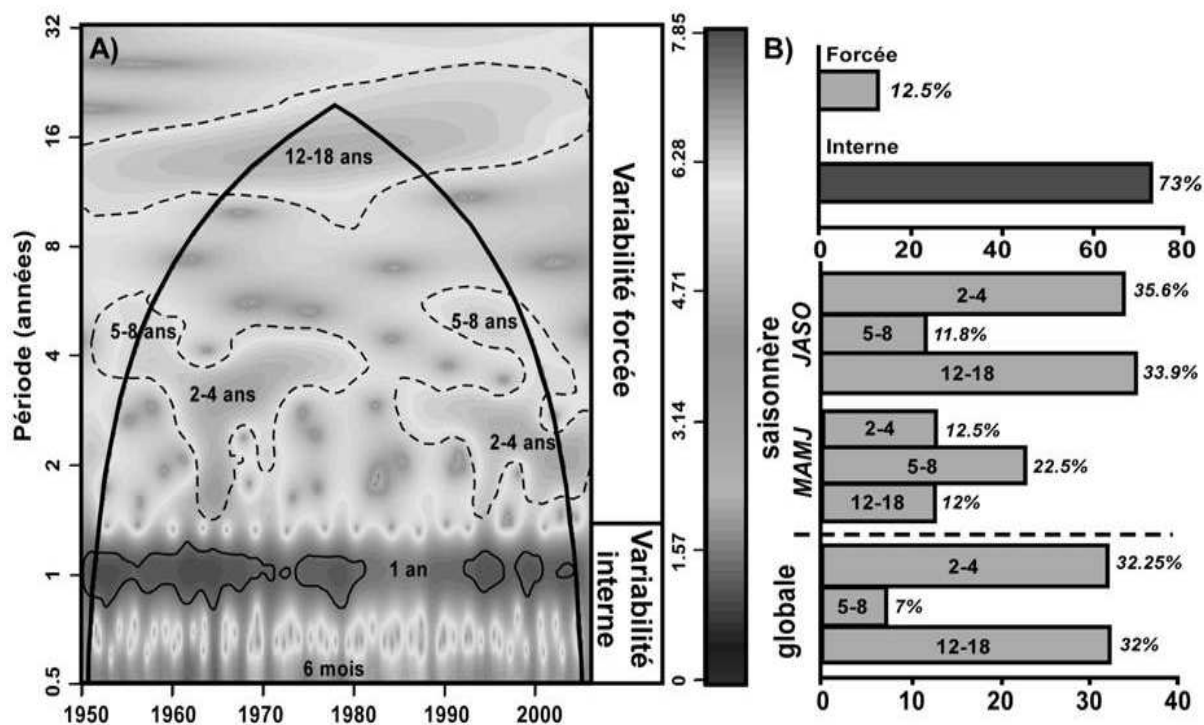


Figure 5.A : spectre en ondelettes des cumuls mensuels de précipitations à Maïné-Soraa sur la période 1950-2005 (trait continu gras : cône d'influence ; traits continus fins : limite de confiance 90%, simulation Monte-Carlo avec un bruit blanc $AR(1)=0$; pointillés : limite de confiance 90% après filtrage des bandes 6 mois et 1 an, simulation Monte Carlo avec un bruit blanc $AR(1)=0$). B : expression des pourcentages de la variance du signal.

Elle comprend deux modes principaux 2-4ans et 12-18ans (32.25 et 32%) (Fig.5B). Toutefois l'expression des modes basses fréquences semble être soumise à une modification saisonnière (Fig.5B). Lors de la phase océanique de la mousson (mars à juin) le mode 5-8ans domine (22.5%), tandis qu'au cours de la phase continentale (juillet à septembre) les modes 2-4ans et 12-18ans sont dominants (respectivement 35.6% et 33.9%) (Fig.5B)

Afin de mieux observer la variabilité interne (haute fréquence), nous avons établi les moyennes journalières (pour chaque jour de l'année sur toutes les années considérées) lors des régimes humide (1950-1967) et aride (1968-1993). Cette méthode nous permet d'observer les modifications entre deux régimes pluviométriques extrêmes. L'observation des régimes montre une chute généralisée des précipitations, surtout marquée lors de la phase océanique et au cœur de la phase continentale (août) (Fig.6A). La transformée en ondelettes montre deux modes intra-saisonniers : 4-9jrs et 16-20jrs. Comme le décrivent Sultan et Janicot (2003), les modulations de l'activité convective sont caractérisées par des phases de renforcement et d'affaiblissement de la mousson d'une période de 9jrs qui appartiennent à un signal

quasi-périodique de 15 jours, ce qui correspond bien à nos modes 4-9jrs et 16-20jrs. On remarque que l'activité convective se développe rapidement

(avril) sur de plus longues périodes (supérieures à la semaine) en régime humide (Fig.6B). Ce n'est pas le cas en régime aride où l'activité convective se développe progressivement au cours de la saison (Fig.6B). Diverses hypothèses concernent le mode 16-20 jrs : intrusion d'air sec sub-tropical (Roca et al., 2005) ou passage d'ondes atmosphériques planétaires (Matthews, 2002 ; Mounier et al., 2007). Sans rentrer dans cette discussion, l'observation des deux régimes montre un déplacement saisonnier de cette perturbation : en régime humide cette modulation apparaît lors de la transition entre la phase océanique et la phase continentale (Fig.6B) ; en régime aride cette modulation est centrée sur la phase continentale (Fig.6B). Lors du régime aride, la baisse marquée de l'activité convective au milieu du mois d'août (Fig.6A), semble être en relation avec l'apparition retardée du mode 16-20jrs (Fig.6B).

Les événements pluvieux étant directement associés à l'activité convective, il est important de comprendre comment ceux-ci sont liés à la variabilité basse fréquence. En ce sens, la disparition du mode 5-8ans peut être reliée à la

moindre activité des cellules de convection lors de la phase océanique. Le fonctionnement différent du mode 16-20jrs, entre régime humide et régime

aride, pourrait être associé à une modification du mode dominant lors de la phase continentale, soit le passage du mode 2-4ans au mode 12-18ans.

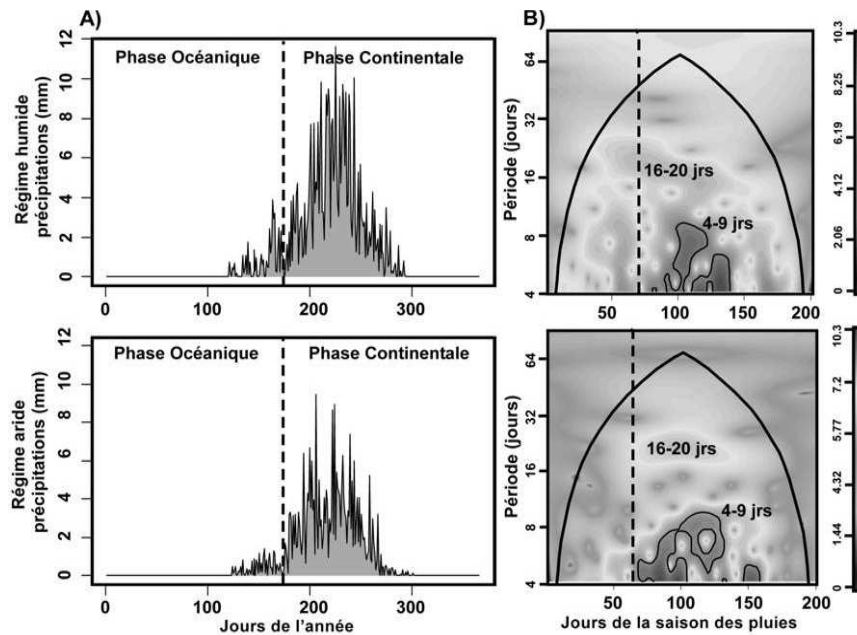


Figure 6.A : précipitations journalières moyennes (mm.jrs-1) à Mainé-Soraa lors des régimes humide et aride. B : spectre en ondelettes (données journalières) des régimes humide (1950-1967) et aride (1968-1993) (trait gras : cône d'influence ; traits fins : limite de confiance 90%, simulation Monte-Carlo graphique).

5. ANALYSE DES FORÇAGES

5.1 RELATIONS AVEC LES CHAMPS DE PRESSION SUBTROPICAUX

La transformée de Fourier et le spectre en ondelette global appliqués à la pression atmosphérique aux Açores permettent d'observer trois modes de fluctuations : deux modes pluriannuels similaires à ceux trouvés lors de l'analyse des précipitations (2-4ans et 5-8ans) et un mode bidécennal (16-22ans) (Fig.7). A partir des analyses de cohérence et phase par ondelettes, sur le mode 2-4ans, l'anticyclone des Açores et la pluviométrie sont en cohérence (Fig.8.A) avec un écart minimum (en phase) de 1950 à 1970 et de 1990 à 2005 (Fig.8.B). Pour le mode 5-8ans, les signaux sont en cohérence (Fig.8.A) avec un écart maximum (opposition de phase) à partir de 1960 et jusqu'à 2005 (Fig.8.B).

La bande 12-18 ans montre des signaux en cohérence (Fig.8.A) et en opposition de phase de 1960 à 1975 (Fig.8.B).

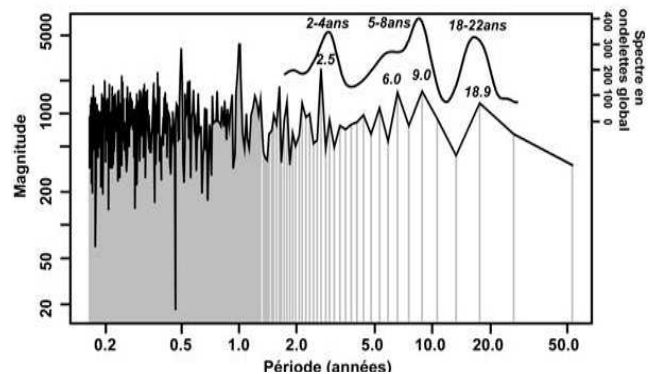


Figure 7 : Transformée de Fourier et spectre en ondelettes global de la pression atmosphérique mensuelle aux Açores entre 1950 et 2005.

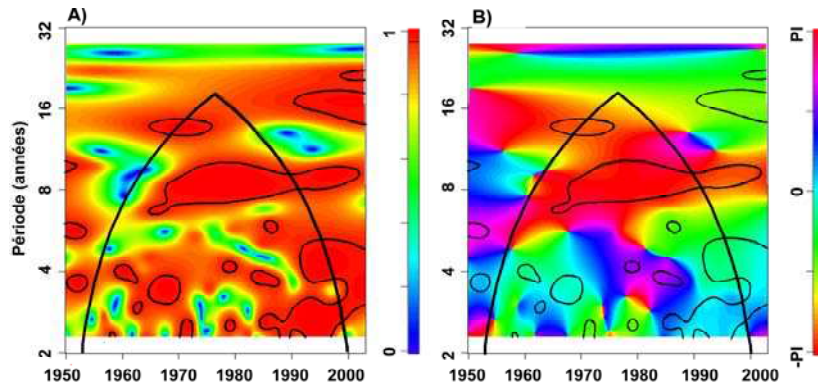


Figure 8.A(B) : spectre de cohérence (phase) par ondelettes entre la pression atmosphérique aux Açores et la pluviométrie à Maïné-Soróa sur la période 1950-2005. (trait gras : cône d'influence ; traits fins : limite de confiance 90%).

5.2 RELATIONS AVEC LES TEMPERATURES DE SURFACE DE L'OCEAN ATLANTIQUE TROPICAL

La transformée de Fourier et le spectre en ondelettes global appliqués aux indices TNA et

TSA montrent trois modes de fluctuations en commun avec les précipitations de Maïné-Soróa : deux modes pluriannuels (2-4ans et 5-8ans), un mode quasi-décennal (12-18ans) (Fig.9A-B).

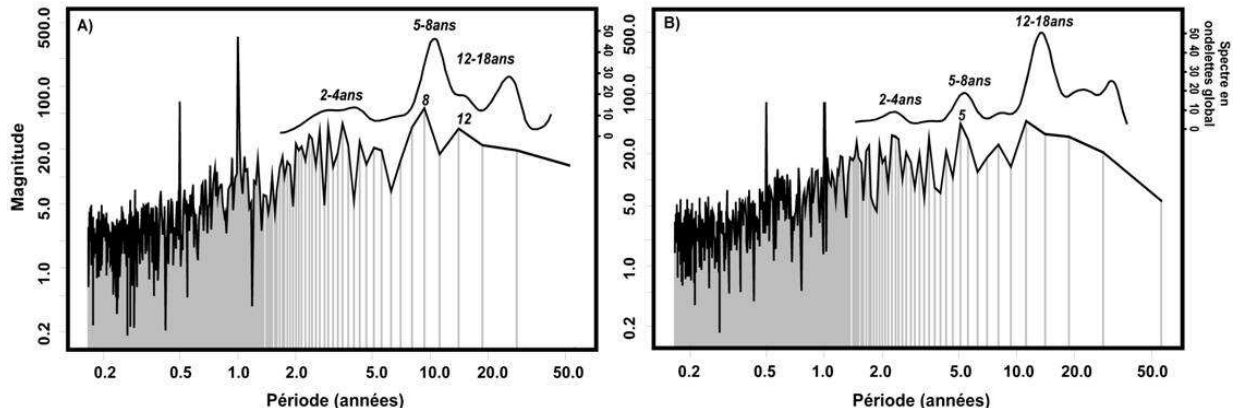


Figure 9.A(B) : Transformée de Fourier et spectre en ondelettes global de l'indice mensuel TNA (TSA) sur la période 1950-2005.

Les indices TNA et TSA présentent un mode 5-8ans centré respectivement sur 8ans et 5ans, ce qui semble être en accord avec les deux pics de fréquences des précipitations à Maïné-Soróa sur le mode 5-8ans (5.3 et 8.4ans) (Fig.9A-B). Pour le mode 2-4ans, TNA et pluviométrie à Maïné-Soróa sont en cohérence et en quadrature de phase entre 1960 et 1980 (Fig.10A-1), puis les signaux sont en opposition de phase mais peu cohérents (Fig.10A-2). Sur la même bande de fréquence l'indice TSA et la pluviométrie sont en cohérence sur tout le signal (Fig.10B-1) avec un retard maximum (opposition de phase) aux alentours de l'année 70 (Fig.10B-2).

De 1950 à 1960, pour le mode 5-8ans, l'indice TNA est en cohérence (Fig.10A-1) et en phase avec la pluviométrie (Fig.10A-2). L'indice TSA, en cohérence avec la pluie depuis 1970 (Fig.10B-1), montre des retards différents sur la même bande de fréquence. Il est en opposition de phase dans les années 70, puis apparaît en phase dans les années 90 (Fig.10B-2). Sur le mode 12-18ans, l'indice TNA est en cohérence depuis 1970 avec la pluviométrie (Fig.10A-1) mais en quadrature de phase (Fig.10A-2) ; l'indice TSA est en cohérence sur tout le signal (Fig.10B-1) et en opposition de phase après 1975 (périodes >16 ans) (Fig.10B-2).

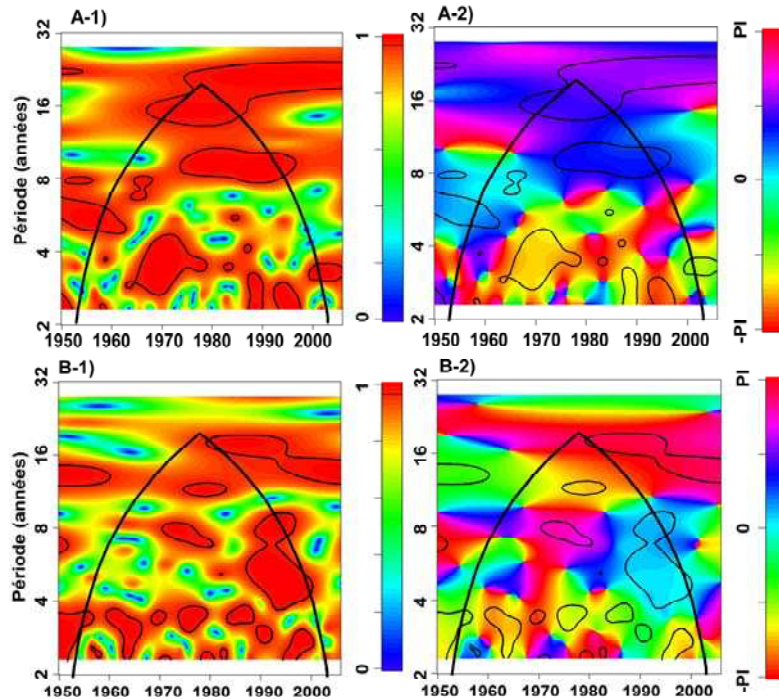


Figure 10.A.1(B.1) : spectre de cohérence par ondelettes entre l'indice TNA (TSA) et la pluviométrie à Maïné-Soróa sur la période 1950-2005. A.2(B.2) : spectre de phase associé (trait gras : cône d'influence ; traits fins : limite de confiance 90%).

6. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'évolution des précipitations à Maïné-Soróa présente trois périodes : humide (1950-1967), aride (1968-1993) et semi-aride (1994-2005) (Fig.3). L'utilisation de la transformée en ondelettes permet de mettre en évidence des modes fréquentiels hautes et basses fréquences : deux modes intra-saisonniers 4-9jrs et 16-20jrs, deux modes saisonniers 6 mois et 1 an, deux modes pluriannuels (2-4ans et 5-8ans) et un mode quasi-décennal (12-18 ans) (Fig.5).

Le régime humide est décrit par une activité convective mature (mode 4-9jrs), et perturbée lors de la transition de juin entre la phase océanique et la phase continentale de la mousson (mode 16-

20jrs) (Fig.6) ; cette variabilité interne est, de plus, forcée par deux modes pluriannuels se succédant dans le temps (5-8ans puis 2-4ans) identifiés comme étant liées aux TNA puis à l'anticyclone des Açores (Fig.8, 10 et 11).

Le régime aride se caractérise par une activité convective peu développée et perturbée au cœur de la phase continentale (août) ; cette activité est elle-même forcée par un mode 12-18ans identifié lorsque les TSA sont en opposition de phase (ainsi que l'anticyclone des Açores dans la première partie du régime) (Fig.10 et 11).

Du fait de sa grande variabilité, nous n'avons pas réalisé d'analyse intra-saisonnière sur le régime semi-aride. Cependant, on remarque des modes

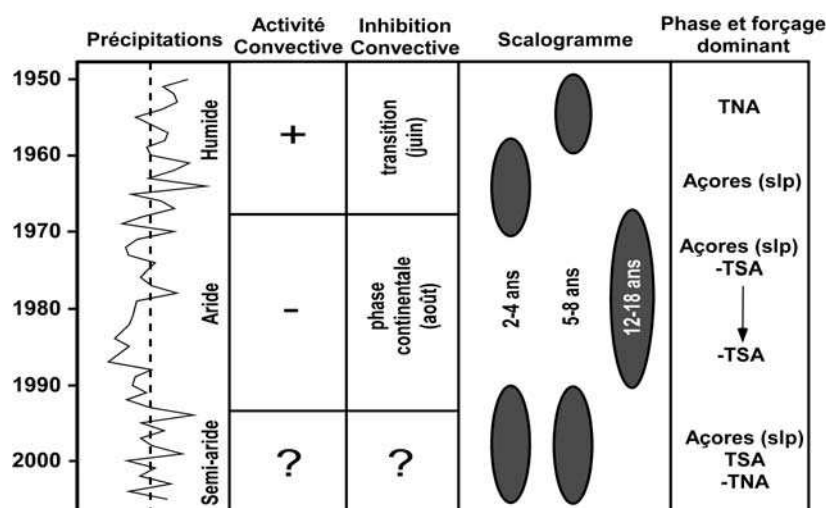


Figure 11 : schéma récapitulatif de la variabilité des précipitations à Mainé-Soroa sur la période 1950-2005.

basses fréquences concomitants et des phases mitigées ce qui permet déjà de comprendre la grande variabilité des précipitations dans la période récente (Fig.3, 10 et 11).

Par ailleurs, le gradient thermique méridien semblerait aussi être affecté par des phénomènes de plus grande ampleur comme l'ENSO. Czaja *et al.* (2002) montrent que trois quarts des événements ENSO (positifs ou négatifs) sont associés à des anomalies de températures de surface de l'Atlantique Nord Tropical. De plus, il ne faut pas oublier que le phénomène ENSO est le siège de variations intra-saisonnières importantes telles que l'oscillation Jullian-Madden ou encore la propagation des ondes atmosphériques de Rossby et Kelvin (Matthews, 2002) qui doivent aussi jouer un rôle.

REFERENCES

- Cayan D., 1991: Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: the connection to monthly atmospheric circulation. *Journal of climate*, 5, 354-369.
- CCMA, 2002 : *Livre blanc sur la mousson ouest-africain et ses différentes composantes*. AMMA, 66p.
- Czaja A., Van der Vaart P. & Marshall J., 2002: A diagnostic study of the role of remote forcing in tropical Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, 15, 606-623.
- Eltahir E.A.B., Gong C., 1996: Dynamics of wet and dry years in west Africa, *Journal of Climate*, 9, 1030-1042.
- Labat D., 2005: Recent advances in wavelet analyses: Part I. A review of concepts. *Journal of Hydrology*, 314, 275-288
- Le Barbé L., Lebel T. & Tapsoba D., 2002 : Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950-90. *Journal of Climate*, 15, 187-202.
- Lebel T. & Ali A., 2009: Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375, 52-64.
- Lebel T., Diedhiou A. & Laurent H, 2003 : Seasonal cycle and interannual variability of the sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research*, 108(D8), 8389.
- L'Hôte Y. & Mahé G., 1995 : *Afrique Centrale et de l'Ouest : précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989), carte au 1/60000000*. ORSTOM Editions.
- Matthews A.J, 2002 : Intra-seasonal variability over West Africa. *25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 652-653.
- Maraun D., 2006: *What Can We Learn from Climate Data? Methods for Fluctuation Time/Scale and Phase Analysis*. Universitât Postdam, 127p.
- Mounier F., Kiladis G.N. & Janicot S., 2007 : Analysis of the Dominant Mode of Convectively Coupled Kelvin Waves in the West African Monsoon. *Journal of Climate*, 20, 1487-1503.
- Roca R., Lafore J.P, Piriou C. & Redelsperger J.L., 2005 : Extra-tropical dry air intrusions into the West African Monsoon Midtroposphere: An Important Factor for the Convective Activity over the Sahel. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 62, 390-406.
- Sultan B. & Janicot S., 2003: The West African monsoon dynamics. Part I : Documentation of Intraseasonal Variability. *Journal of Climate*, 16 (21), 3389-3406.
- Ward M.N., 1998: Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multidecadal timescales. *Journal of Climate*, 11, 3167-3191.